

定圧一面せん断試験における超過圧密粘土のせん断強度特性

信州大学大学院 学生会員○本郷五十鈴
信州大学工学部 正会員 梅崎健夫

1.はじめに 通常、一面せん断試験機で過圧密粘土に対してせん断試験を行う場合、所定の圧密応力から除荷・膨潤を行って低垂直応力でせん断する。しかし、筆者らは、定体積一面せん断試験において、 $\sigma_c=98.0\text{kN/m}^2$ 未満の領域における試験結果の妥当性には検討が必要であることを指摘している^{1)・2)}。そこで、高圧圧密試験機を用いて粘土供試体を圧密し、その供試体を一面せん断試験機に設置して通常の垂直応力のもとでせん断試験を実施することにより、過圧密比の非常に大きな超過圧密粘土のせん断強度特性を考察したものである。

2.実験方法 試料は NSF 粘土($G_s=2.756$, $w_L=61.1\%$, $I_p=27.4$)である。含水比 120%($\equiv 2w_L$)で練り返し、一次元的に予圧密($\sigma_v=133.3, 294\text{kN/m}^2$)した試料を直径 6cm, 高さ 2cm に成形して供試体とした。標準圧密試験機および 10035.2kN/m²まで载荷可能な高圧圧密試験機で圧密圧力 $p_0=156.8\text{kN/m}^2$ から荷重増加率 $\Delta p/p=1$ で最大圧密圧力 $p_{\max}=\sigma_c=156.8, 313.6, 627.2, 1254.4, 2508.8, 5017.6, 10035.2\text{kN/m}^2$ までそれぞれ圧密し、その後引き続き、荷重減少率 $\Delta p/p=1$ で $p_f=19.6\text{kN/m}^2$ まで膨潤を行った。なお、圧密・膨潤過程ともに両面排水で各段階は 24 時間とした。圧密・膨潤した供試体を取りだし、H-II 型一面せん断試験装置(垂直荷重は反力側で測定)へ設置し、垂直応力 $\sigma_N=156.8\text{kN/m}^2$ で再圧密することにより、異なる過圧密比($\text{OCR}=\sigma_c/\sigma_N=1, 2, 4, 8, 16, 32, 64$)の粘土の定圧一面せん断試験を実施した。試験は σ_N で 60 分間再圧密した後、上下せん断箱の隙間を 0.2mm に設定し、反力側の垂直応力が一定となるよう σ_N を制御する「真の定圧」試験を水平変位 7mm までせん断速度 0.02mm/min で行った。

3.実験結果および考察 図-1 に $p_{\max}=156.8\sim 10035.2\text{kN/m}^2$ までの広範囲な応力域の圧密・膨潤曲線を示す。標準圧密試験において、圧縮指数 $C_c=0.48$ の正規圧密線 NCL と、膨潤指数 $C_s=0.12$ の膨潤線が得られた。高圧圧密領域においても C_c は等しく、同一の NCL が得られるが、膨潤指数 C_s は圧密圧力が大きいほど若干大きな値が得られる。また、供試体の飽和度 $S_r=100\%$ とみなして NSF 粘土の塑性限界($w_p=33.7\%$)における間隙比 e_p ($e_p=G_s \cdot w_p/S_r$)を算出すると $e_p=0.929$ である。1254.4kN/m²以上の領域で得られる e は e_p よりも小さな値を示す。図中のプロットは、所定の圧密圧力から十分な膨潤を行い圧密試験機から取り出した OCR の異なる過圧密粘土をそれぞれ一面せん断試験機に設置して $\sigma_N=156.8\text{kN/m}^2$ で再圧密したときの間隙比 e_N を OCR ごとに示したものである。それらの値はすべて膨潤線の上にある。このことは、再圧密線が膨潤線の上方に位置するヒステリシスを描くためであり、図-2 に示す圧

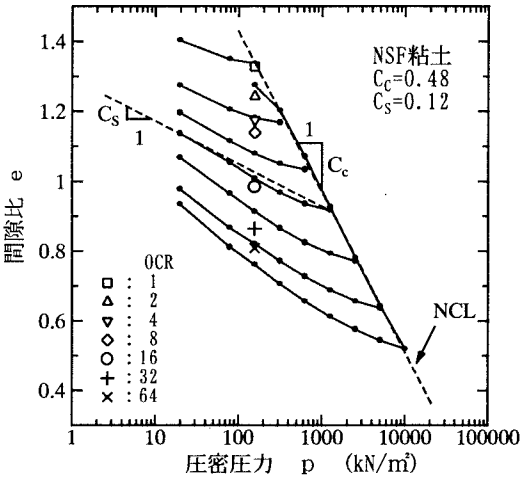


図-1 広範囲な応力域の圧密・膨潤曲線

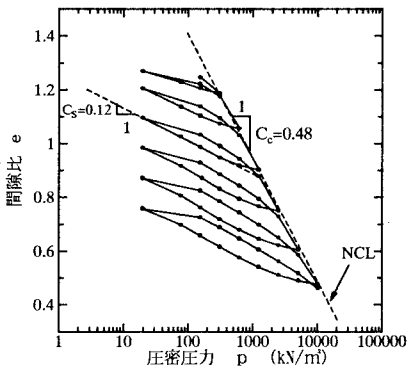


図-2 圧密・膨潤・再圧密曲線 (各段階とも時間は3分とした)

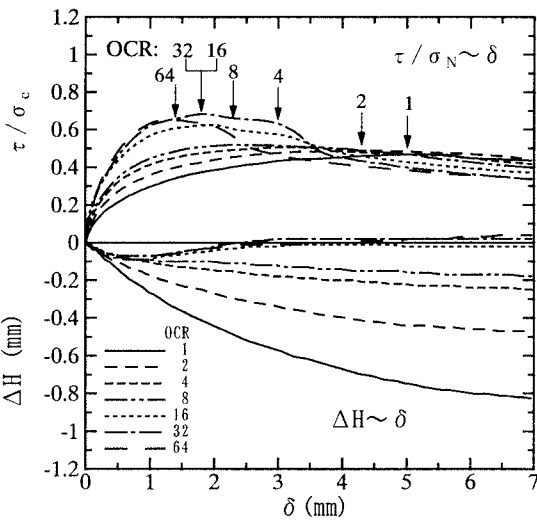


図-3 $(\tau/\sigma_N) \sim \Delta H \sim \delta$ 関係

密・膨潤・再圧密曲線（各段階とも時間は3分とした）より説明できる。

図-3 にせん断応力 τ を垂直応力 σ_N で正規化した応力比 τ/σ_N および垂直変位量 ΔH と水平変位 δ の関係を示す。 $\tau/\sigma_N \sim \delta$ 関係は $OCR=1 \sim 8$ ではひずみ硬化型、 $OCR=16 \sim 64$ ではひずみ軟化型を示す。また、 OCR が大きいほど初期接線勾配（せん断剛性）も大きい。ダイレイタンスは $OCR=1 \sim 8$ では圧縮で、 $OCR=16 \sim 64$ では圧縮から膨張に転じる。 τ/σ_N のピークを破壊点とし、破壊ひずみ δ_f を矢印で示す。破壊は OCR が大きいほどせん断変位の早い段階で生じる。

図-4 にせん断終了後の含水比分布を示す。含水比 w は、せん断後の供試体を5分割することによって調べた。その際、せん断面を含む層を、全ての試験において同じ条件で分割できるよう工夫した。すなわち、せん断面が供試体高さの10 mmの位置にあるため、切断位置は、供試体の4, 8, 12, 16 mmの高さで行っている。 $OCR=1 \sim 8$ ではダイレイタンスが圧縮であるため、せん断面で含水比が低下する。 $OCR=16 \sim 64$ はダイレイタンスが膨張のため、せん断面の含水比が高い。ただし $OCR=8$ についてはせん断試験による含水比の低下がほとんど見られなかった。また、せん断開始時（再載荷時）における間隙比 e_N から飽和度100%としてこのときの含水比 w_N ($w_N = e_N \cdot Sr / G_s$) を算出したものを図中の表に示す。 $OCR=16, 32$ の試験後の含水比 w は w_p より大きいが、 w_N は w_p より小さい。また、 $OCR=64$ については w, w_N ともに w_p より小さい。したがって、 $OCR=16 \sim 64$ の w_N は塑性限界付近あるいは塑性限界よりも小さい。このため $OCR=16 \sim 64$ は、わずかなせん断力に対し粒子間で結合を失う部分が広がり、亀裂を生じやすい状態である³⁾ことも考えられる。

図-5 は τ/σ_N と $\log OCR$ の等変位ごとの関係を示したものである。図中には δ_f も示す。 $OCR=1 \sim 8$ と $OCR=16 \sim 64$ では曲線形状が異なる。さらに $OCR=16 \sim 64$ は破壊後の τ/σ_N の低下が著しい。せん断を終了した $\delta = 7 \text{ mm}$ では、 τ/σ_N が一定値をとっておらず、すべての OCR で残留状態に達していないものと考えられる。

図-6 に破壊時の応力比 $(\tau/\sigma_N)_f$ と OCR の関係を両対数表示する。三田地ら⁴⁾ は $OCR < 10$ の粘土に対して非排水せん断における c_u/p と OCR の関係が両対数上で直線で表されることを示している。本研究においても破壊強度と OCR の関係は $OCR \leq 8$ まで直線関係が得られているが、 $OCR > 10$ は強度が著しく増加する。これは、超過圧密粘土の含水比が塑性限界付近に達していることが一因とも考えられる。

4.まとめ NSF 粘土を用いた高圧圧密試験と、超過圧密粘土の定圧一面せん断試験の結果より以下のことが得られた。①高圧密領域においても一定の圧縮指数 C_c が得られるが、膨潤指数 C_s は圧密圧力が高いほど若干大きな値が得られる。②圧密応力 1254.4 kN/m^2 以上の領域における含水比は塑性限界 w_p よりも小さくなる。③ τ/σ_N は OCR に伴い増加する。 $OCR \leq 10$ においては直線関係が見られるが、 $OCR=16, 32, 64$ ではそれ以上の大きな値が得られる。ただし、 $OCR > 10$ のせん断前の含水比は塑性限界より小さい値であった。

[参考文献] 1) 本郷ら：第34回地盤工学会，pp557-558，1999。2) 本郷ら：土木学会第54回年次学術講演会，pp108-109，1999。3) 山口柏樹：土質力学（全改訂）第3版，pp21～22，1996。4) Mitachi, T. and Kitago, S. : Soils and Foundations, Vol.16, No.1, pp45 - 58, 1976。

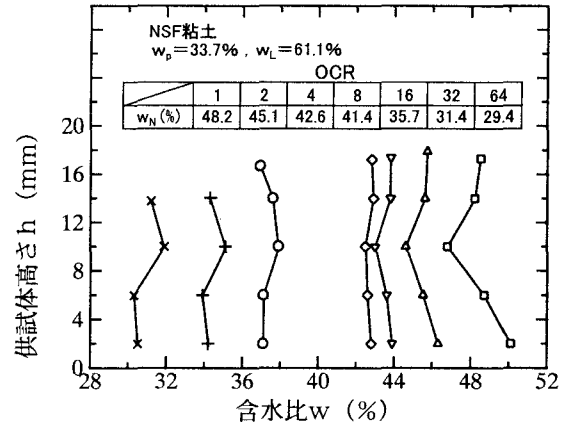


図4 せん断試験終了後の含水比分布

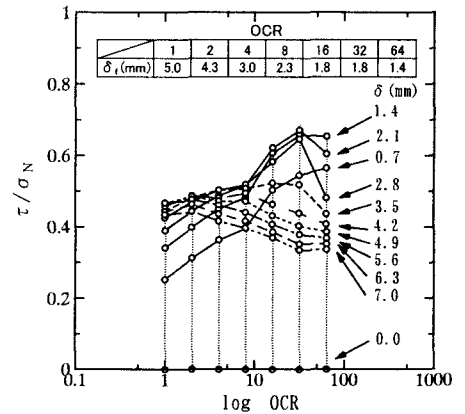


図-5 $(\tau/\sigma_N) \sim \log OCR$ の関係

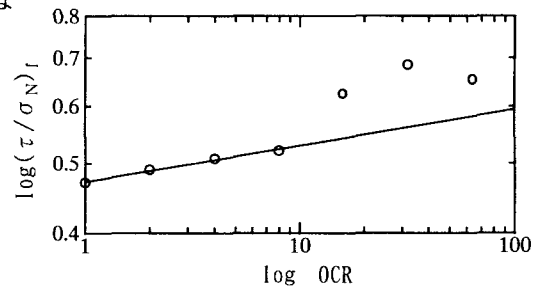


図-6 $\log (\tau/\sigma_N)_f \sim \log OCR$ の関係